

## BIVALVOS ENDOLÍTICOS Y BIOEROSIÓN EN ACANTILADOS Terciarios en dos bahías de la Costa Pacífica Colombiana

**Yeimy Andrea Ocampo Gil**

Grupo de investigación ECOMANGLARES, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Calle 13 No. 100-00, Cali AA. 25360, Colombia  
correo electrónico: yeimy.ocampo@correounivalle.edu.co

**Jaime Ricardo Cantera Kintz**

Universidad del Valle, Apartado Aéreo 25360, Cali, Colombia.  
correo electrónico: jaime.cantera@correounivalle.edu.com

### RESUMEN

Los bivalvos endolíticos contribuyen en la erosión de acantilados rocosos, generando progresivamente el retroceso de la línea costera. Esto los convierte en importantes modificadores de las geoformas litorales, que afectan las dinámicas poblacionales de muchas especies que dependen del intermareal rocoso. En este trabajo se caracterizó la abundancia, diversidad y distribución de bivalvos endolíticos en acantilados con baja, mediana y alta exposición al oleaje en Bahía Málaga y Buenaventura. Para el muestreo se extrajeron tres bloques de roca de 3375 cm<sup>3</sup> de la zona intermareal baja y media. Se cuantificó la densidad de perforación de los acantilados realizando análisis fotográfico de tres cuadrantes de 625 cm<sup>2</sup> por cada zona intermareal, documentando el proceso a lo largo de 160 días. También se estimó el volumen de remoción y la tasa de erosión mensual de *Pholadidea tubifera*, midiendo diámetro, profundidad de madriguera y volumen del individuo. Se encontró que las localidades con mayor riqueza fueron Pianguita, Despensa y Juanchaco M con 13, 11 y 10 especies respectivamente, siendo *Pholadidea tubifera*, *Jouannetia pectinata*, *Cyrtopleura crucigera* y *Brachidontes semialevis* las más abundantes. La zona intermareal baja presentó mayor abundancia y diversidad de especies con valores de H' cercanos a 1,2. El número de perforaciones promedio en bahía Málaga fue mayor en la zona media que en la zona baja y fue Juanchaco M la localidad de mayor densidad de perforación (2713 perf./m<sup>2</sup>). Las tasas de erosión estuvieron entre 4,7 y 18,1 mm<sup>3</sup>/mes en la Despensa y entre 5,1 y 75,3 mm<sup>3</sup>/mes en Juanchaco M.

*Palabras clave:* bivalvos endolíticos, intermareal rocoso, densidad de perforación, tasas de erosión.

### ABSTRACT

Endolithic bivalves contribute to the erosion of rocky cliffs, generating progressively coastline retreat. For this reason, they are important modifiers of coastal geoforms, affecting the population dynamics of many species that depend on the rocky intertidal biotope. In this work was characterized the abundance, diversity and distribution of endolithic bivalves on cliffs with low, medium and high exposure to waves in Malaga and Buenaventura bay. For sampling, three blocks of rock of 3375 cm<sup>3</sup> were extracted in the lower and middle intertidal zone. Density of perforations was quantified making photographic analysis on three quadrants of 625 cm<sup>2</sup> by each intertidal zone, documenting the process during 160 days. Also the volume removal and erosion rate monthly was estimated in *Pholadidea tubifera*, measuring diameter and depth of holes and volume of the individuals. It was found that areas with greater richness were Pianguita, Despensa and Juanchaco M with 13, 11 and 10 species respectively, being *Pholadidea tubifera*, *Jouannetia pectinata*, *Cyrtopleura crucigera* and *Brachidontes semialevis* the most abundant. Low intertidal zone had higher abundance and diversity of species with H' values close to 1.2. The average number of perforations in Malaga Bay was higher in the middle intertidal than in the lower area and the locality JM had higher density of perforations (2713 perf./m<sup>2</sup>). Erosion rates were between 4.7 and 18.1 mm<sup>3</sup> /month in DP and between 5.1 and 75.3 mm<sup>3</sup> / month in Juanchaco M.

*Key words:* bivalve endolithic, bioerosion, rocky intertidal, perforations density, erosion rates.

## INTRODUCCIÓN

La erosión biológica es uno de los agentes destructores y modificadores más importantes de las costas rocosas, debido a la continua remoción de material, por organismos que viven sobre y dentro del sustrato y realizan actividades de supervivencia diaria (Cantera *et al.* 1998, Naylor *et al.* 2012). Para que un organismo pueda prosperar en las costas rocosas intermareales, debe enfrentarse a importantes variaciones en los factores físicos del medio (temperatura, exposición al aire, impacto del oleaje), factores químicos (acidificación, corrosión) y biológicos (depredación) (Little & Kitching 1996; Bagur *et al.* 2014). Por esta razón, muchas especies de bivalvos han desarrollado la capacidad de alojarse al interior de las rocas, presentando tres tipos de hábitos: euendolítico (verdadero perforador), criptoendolítico (ocupa perforaciones biogénicas preexistentes) y abrasionador, que erosiona superficialmente por fricción de las valvas el lugar al que se fija (Cantera *et al.* 1998).

El caso de los perforadores es interesante, pues colonizan el sustrato rocoso en los primeros estadios de vida y excavan sus madrigueras dentro de las estructuras rocosas. Los individuos dejan los sifones paleales en contacto con el medio externo y la remoción de material se produce a medida que éstos van creciendo; agrandando la cavidad por medio de procesos erosivos de carácter químico, mecánico o la combinación de ambos (Stearley & Ekdale 1989; Kazmer & Taborosi 2012). La perforación es un hábito que se encuentra bien desarrollado en cuatro familias de Pelecípodos: Petricolidae y Pholadidae (principalmente barrenadores mecánicos) y Gastrochaenidae y Mytilidae (involucran secreciones químicas sobre el sustrato). Algunas especies de Petricolidae y Pholadidae han sido reportadas como responsables de la mayor cantidad de perforaciones en rocas blandas, mientras que las especies de Gastrochaenidae y Mytilidae han sido reportadas sobre rocas duras o corales (Cobo & Cantera 2015).

Naylor *et al.* (2012) desarrollaron un modelo conceptual de la erosión en costas rocosas, el cual establece que la mayoría de los procesos geomorfológicos se ven afectados por organismos bioerosionadores que reducen considerablemente la resistencia de la roca. Este modelo complementa el históricamente establecido por Sunamura (1994), que subestima el papel de los agentes biológicos y le da mayor importancia a la relación entre la fuerza de las olas y la resistencia de la roca.

La bioerosión es un proceso que ocurre en dos vías, con mayor susceptibilidad del sustrato a la erosión física cuando los organismos endolíticos degradan la

estructura rocosa, pero también donde las condiciones físicas y oceanográficas permiten con mayor facilidad la colonización de organismos bioerosionadores (Bagur *et al.* 2014). Esto genera un continuo retroceso en la línea costera a causa de la destrucción progresiva de los acantilados (Cantera *et al.* 1998, Posada *et al.* 2009; Cantera *et al.* 2013). Las costas se transforman con el tiempo en playas rocosas de bloques, cantos rodados y gravas en lugares donde antes existían formaciones geológicas verticales o de gran pendiente (Cobo 2007).

La modificación del paisaje a causa de la bioerosión da lugar a otro proceso llamado sucesión, el cual implica variaciones significativas en la composición de la comunidad y las estrategias de vida de las especies. La totalidad de este proceso es lento, continuo y frecuentemente interrumpido por perturbaciones naturales locales de diferente magnitud. En consecuencia, las comunidades bentónicas del ecosistema rocoso intermareal pueden ser observadas como un mosaico de parches en diferentes estados de sucesión (Odum 1993; Bulleri & Benedetti-Cecchi 2006).

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio comparativo del proceso bioerosivo en acantilados rocosos de las bahías de Málaga y Buenaventura, caracterizando la composición de bivalvos endolíticos en términos de abundancia, diversidad y distribución. Se enfatiza en el conocimiento de la relación entre el proceso bioerosivo y la exposición al impacto del oleaje en diferentes niveles mareales, la zonación de los organismos y la densidad de perforaciones en la superficie de los acantilados. Igualmente el trabajo presenta una aproximación a la cuantificación del proceso, estimando las posibles tasas de erosión y los volúmenes de remoción causados por cada especie.

## MÉTODOS

### Área de estudio

Las Bahías Málaga y Buenaventura (Pacífico colombiano) presentan mareas semidiurnas con amplio rango mareal (meso a macrotidal, 3.5 a 4.2 m) que generan fuertes corrientes superficiales y un alto dinamismo en el oleaje (Cantera *et al.* 1998). La geomorfología costera presenta acantilados terciarios compuestos de rocas sedimentarias como lodolitas y limolitas, que son rocas blandas compactadas, presentan diversos grados de alteración y perforación y se encuentran alternadas con rocas duras como areniscas y conglomerados (Galvis & Mojica 1993; Martínez 1993; Cantera & Blanco 2001). Las dos bahías se caracterizan por presentar erosión en su costa rocosa, causada por procesos sinérgicos producto de aguas de escorrentía, infiltración, oleaje, fracturas y bioerosión, que con el tiempo han facilitado

la formación de arcos, cavernas, islotes, riscales y movimientos de masas de suelo (Posada *et al.* 2009).

En cada una de las bahías se establecieron tres locali-

dades de muestreo sobre acantilados rocosos que se encuentran en zonas de baja, mediana y alta exposición al impacto del oleaje (Tabla 1).

**Tabla 1.** Localidades de muestreo en Bahía Buenaventura y Bahía Málaga.

| Bahía        | Localidad   | Abreviación | Exposición mareal | Latitud      | Longitud      |
|--------------|-------------|-------------|-------------------|--------------|---------------|
| Buenaventura | Aguacate    | AG          | Baja              | 3°53'32.00"N | 77°1'48.32"W  |
|              | Cangrejal   | CJ          | Mediana           | 3°53'38.38"N | 77°6'0.09"W   |
|              | Piangüita   | PN          | Alta              | 3°50'0.71"N  | 77°12'24.23"W |
| Málaga       | La Despensa | DP          | Baja              | 3°56'8.28"N  | 77°20'48.70"W |
|              | Juanchaco M | JM          | Mediana           | 3°55'36.53"N | 77°21'27.55"W |
|              | Juanchaco A | JA          | Alta              | 3°55'36.72"N | 77°21'34.34"W |

### Abundancia, diversidad y distribución de bivalvos endolíticos

Se extrajeron tres bloques de roca al azar de 15 x 15 x 15 cm en la zona intermareal baja y tres en la zona media cada localidad, empleando una sierra eléctrica de disco. Los bloques fueron fraccionados para retirar, cuantificar e identificar taxonómicamente los bivalvos encontrados. Los organismos colectados fueron identificados en el laboratorio del grupo de Investigación Ecología de Estuarios y Manglares de la Universidad del Valle, utilizando las guías taxonómicas de Keen (1971), Olsson (1961), Fisher *et al.* (1995), Cantera *et al.* (1998) y Cantera *et al.* (2011). Los especímenes colectados fueron depositados en la Colección de Biología Marina de la Universidad del Valle (Cali-Colombia).

### Densidad de perforación, volumen y tasa de bioerosión

Se establecieron tres cuadrantes permanentes de 25 x 25 cm en la zona intermareal media y baja de la localidad DP, JM y JA y se removió parte del material rocoso de manera perpendicular al acantilado utilizando un formón. Los bivalvos quedaron medianamente expuestos al medio, se eligieron en cada cuadrante hasta diez individuos y se realizaron mediciones de profundidad y diámetro superficial de las perforaciones con un calibrador electrónico. Se realizaron 4 mediciones durante 160 días en las siguientes fechas: Junio 1 (día 0), Julio 15 (día 45), Septiembre 25 (día 115) y Noviembre 9 (día 160) del 2015.

Al cabo de 160 días fueron extraídos los organismos de manera individual empleando un barreno. Cada individuo fue identificado taxonómicamente, se le midió longitud y ancho de la concha con el calibrador electrónico y se calculó su volumen por medio del método de desplazamiento de agua utilizando probetas de 1 ml y 10

ml. Se utilizaron las siguientes ecuaciones para determinar el volumen de remoción total (ecuación 1) y la tasa de erosión acumulada de los individuos (ecuación 2).

$$\text{Volumen de remoción} = VC + VE$$

Ecuación 1.

$$\text{Tasa de erosión} = VE / \text{tiempo}$$

Ecuación 2.

Dónde: **VC** es el volumen de la concha.

Y **VE** es el volumen removido calculado entre la abertura de la perforación y la profundidad del individuo.

A través del registro y el análisis fotográfico de los cuadrantes, se cuantificó el número de perforaciones presentes en los acantilados, considerando orificios a partir de 0,1 cm de diámetro y se determinó la densidad de perforación promedio por m<sup>2</sup> en cada zona intermareal utilizando el programa Image J.

### Análisis de diversidad y análisis estadísticos

En la comparación de densidad de perforación por zona intermareal en cada localidad, se utilizó una prueba de t-Student y una prueba de ANOVA para la comparación entre localidades por cada zona intermareal, utilizando el programa STATISTICA 8.0. En los casos de heterocedasticidad o asimetría en la distribución de los datos, se utilizaron las pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon y de Kruskal – Wallis. En la comparación de densidad de perforación total por cada localidad se utilizó una ANOVA para diseños no balanceados en el programa InfoStat/L versión 2016 y los análisis de correlación se realizaron aplicando el coeficiente de correlación de Spearman en STATISTICA 8.0.

Para los análisis de diversidad y riqueza de especies se utilizó el software PAST versión 2.17c y para la realización de las curvas de acumulación de especies con rarefacción de Mao Tau e índices de riqueza Chao 1 y

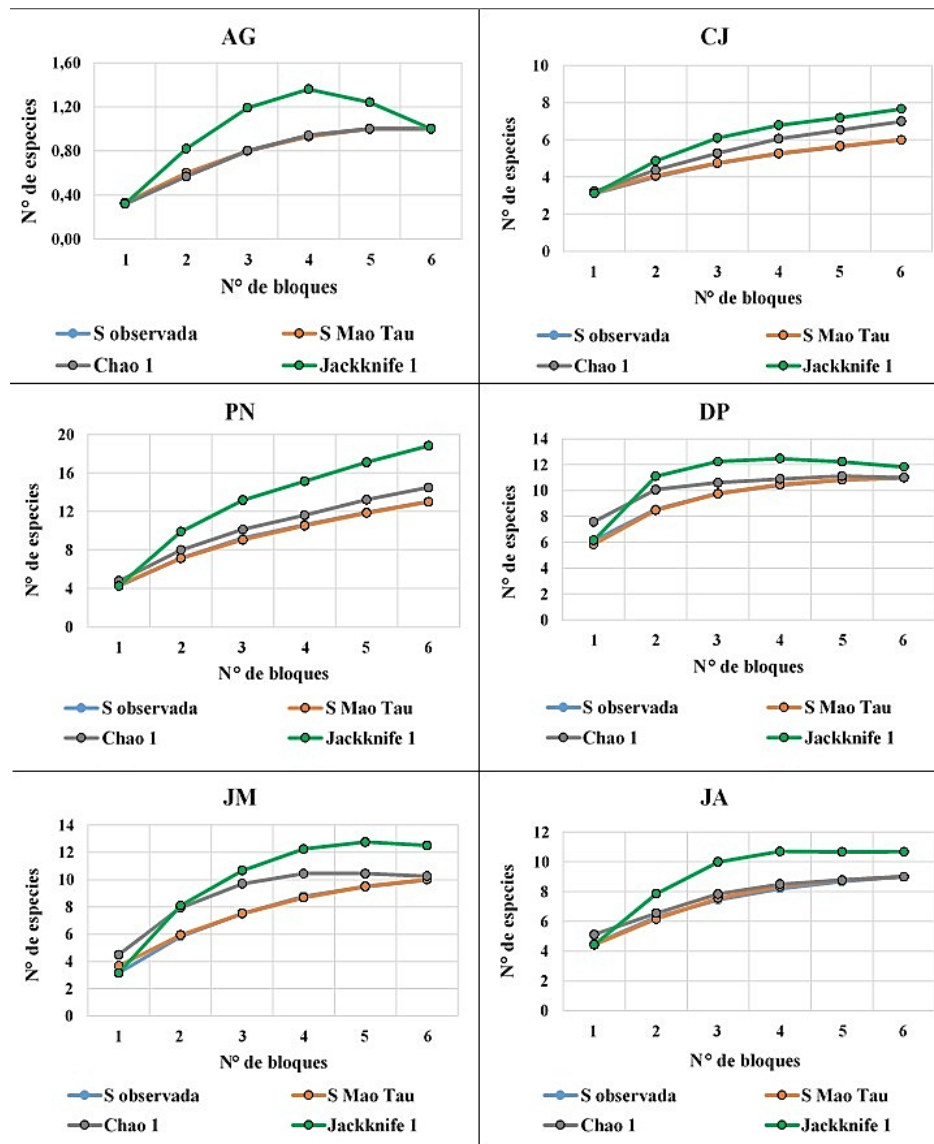
Jackknife 1 se utilizó el programa EstimateS 9.1.0. Para determinar la distribución de cada especie por zona intermareal se aplicó la razón varianza-media o índice de dispersión ( $I = v/m$ ), cuya significancia se estimó con una prueba de  $X^2 = (v/m) (n-1)$ .

## RESULTADOS

### Abundancia, diversidad y distribución de especies de bivalvos endolíticos: comparación por localidades

La curva de acumulación de especies para todas las localidades (Fig. 1) mostró, en general, que el total de

especies colonizadoras que van llegando al sustrato rocoso en cada lugar, puede ser logrado con un esfuerzo de muestreo superior a cinco cuadrantes, que es donde la curva de riqueza observada y la curva con rarefacción empiezan a ser asintóticas. Puede observarse que el índice de riqueza de Chao 1 fue la curva que mejor ajuste tuvo con respecto a las curvas de riqueza por cada localidad, mientras que el indicador de Jackknife 1 resultó ser más sensible, probablemente por tratarse de muestras pequeñas. Las localidades con mayor riqueza fueron PN, DP y JM con 13, 11 y 10 especies respectivamente, mientras JA, CJ y AG tuvieron nueve, seis y una especie cada una.

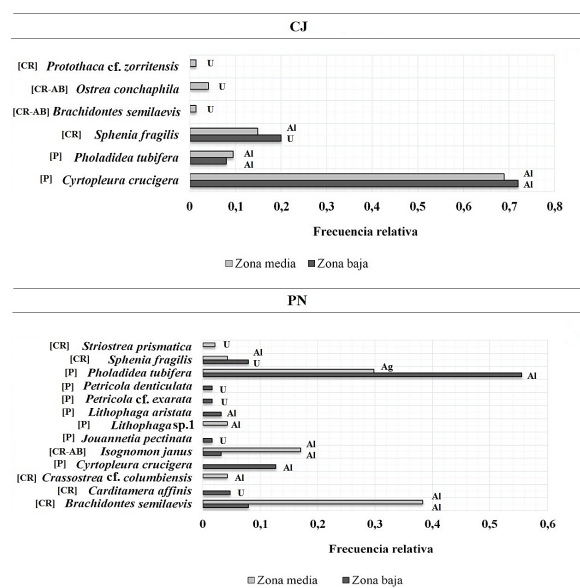


**Figura 1.** Curva de acumulación de especies en bahía Buenaventura: AG, CJ y PN (baja, mediana y alta exposición) y en bahía Málaga: DP, JM y JA (baja, mediana y alta exposición respectivamente). (S observada): riqueza de especies observada. (S Mao Tau) curva de rarefacción.

En AG se encontró únicamente la especie *Cyrtopleura crucigera*, en la zona baja intermareal y cuya distribución espacial fue aleatoria.

En CJ se encontraron seis especies de bivalvos endolíticos (Fig. 2a). *Cyrtopleura crucigera* fue la más abundante, seguida de *Sphenia fragilis* y *Pholadidea tubifera*, las cuales estuvieron presentes en ambas zonas intermareales. *Protothaca* cf. *zorritensis*, *Ostrea conchaphila* y *Brachidontes semilaevis* fueron especies poco abundantes (f. r. <0,1) y exclusivas para la zona baja de esta localidad.

En PN se encontraron 13 especies (Fig. 2b). *Carditamera affinis*, *Cyrtopleura crucigera*, *Jouannetia pectinata*, *Lithophaga aristata*, *Petricola* cf. *exarata* y *Petricola denticulata* tuvieron frecuencias bajas (f. r. <0,15) y fueron especies exclusivas de la zona baja. *Crassostrea* cf. *columbiensis*, *Lithophaga* sp.1 y *Striostrea prismatica* fueron especies poco abundantes (f. r. <0,1) y exclusivas para la zona media. Las demás especies fueron compartidas por las dos zonas intermareales, siendo *Pholadidea tubifera* y *Brachidontes semilaevis* las de mayor dominancia.

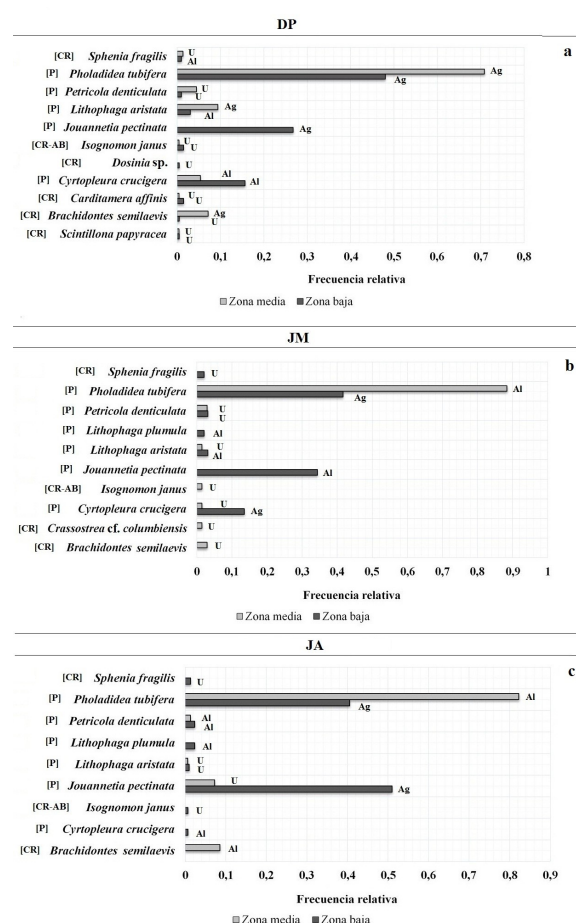


**Figura 2.** Frecuencia relativa de bivalvos endolíticos extraídos en bloques en bahía Buenaventura. Localidad CJ (mediana exposición) (a) y PN (alta exposición) (b). A la izquierda del nombre se presenta el hábito de la especie: [CR]: criptoendolítico; [P]: perforador y [AB]: abraserador. A la derecha de las barras se presenta el tipo de distribución espacial por zona: AI: aleatorio; Ag: agregado y U: uniforme.

En DP se encontraron 11 especies, de las cuales sólo *Dosinia* sp. y *Jouannetia pectinata* fueron exclusivas para la zona baja. Las demás especies fueron compartidas por ambas zonas, siendo *Pholadidea tubifera* la especie de mayor dominancia seguida por *J. pectinata*

y *C. crucigera*. Las especies restantes tuvieron una frecuencia menor a 0,1 (Fig. 3a).

En JM (Fig. 3b) y en JA (Fig. 3c), se encontraron diez y nueve especies respectivamente. En ambas localidades *Pholadidea tubifera* y *Jouannetia pectinata* fueron dominantes en las dos zonas intermareales. *P. denticulata* y *L. aristata* aunque fueron poco abundantes (f. r. <0,05) se compartieron entre las dos zonas. *Brachidontes semilaevis* fue exclusiva de la zona media y *Sphenia fragilis* de la zona baja en las dos localidades. *Crassostrea* cf. *columbiensis* e *Isognomon janus* fueron exclusivas para la zona media en JM y *Cyrtopleura crucigera*, *L. plumula* e *Isognomon janus* fueron especies exclusivas de la zona baja en JA.



**Figura 3.** Frecuencia relativa de bivalvos endolíticos extraídos en bloques de bahía Málaga. Localidad DP (baja exposición) (a); JM (mediana exposición) (b) y JA (alta exposición) (c). A la izquierda del nombre se presenta el hábito de la especie: [CR]: criptoendolítico; [P]: perforador y [AB]: abraserador. A la derecha de las barras se presenta el tipo de distribución espacial por zona: AI: aleatorio; Ag: agregado y U: uniforme.

Puede notarse que la mayoría de especies que fueron exclusivas por zona intermareal o cuyas frecuencias

relativas fueron menores o iguales a 0,2 presentaron distribución espacial uniforme. En el caso de las especies dominantes se observaron distribuciones aleatorias y agregadas, siendo ésta última una característica de especies con hábitos perforadores.

En general, puede observarse que la zona intermareal baja tuvo mayor abundancia de individuos que la zona media en todas las localidades, excepto en DP. También la zona baja tuvo mayor riqueza de especies, excepto en CJ. La dominancia de especies como *Pholadidea tubifera*, *Jouannetia pectinata*, *Brachidontes semilaevis*

y *Cyrtopleura crucigera* vuelve a las comunidades poco heterogéneas, por esta razón se obtuvieron índices de diversidad relativamente bajos. Sin embargo, puede observarse que las zonas bajas de las localidades PN, DP y JM fueron las que mostraron la mayor diversidad de especies, con un índice de diversidad de Shannon  $H'$  cercanos a 1,1, que para un grupo limitado de taxa como son los bivalvos endolíticos, muestra ser un buen indicador del estado de las comunidades en dichas localidades (Tabla 2).

**Tabla 2.** Índices de riqueza y diversidad de especies de bivalvos endolíticos en seis localidades del Pacífico central colombiano. Comparación por zonas intermareales (B): baja y (M): media.

|                    | AG   |      | CG   |      | PN   |      | DP   |      | JM   |      | JA   |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | B    | M    | B    | M    | B    | M    | B    | M    | B    | M    | B    | M    |
| No. especies       | 1    | 0    | 5    | 6    | 10   | 7    | 11   | 9    | 7    | 7    | 8    | 5    |
| Individuos         | 8    | 0    | 25   | 74   | 63   | 47   | 198  | 223  | 96   | 69   | 296  | 152  |
| Dominancia D       | 1,00 | 0,00 | 0,61 | 0,55 | 0,37 | 0,44 | 0,40 | 0,52 | 0,35 | 0,76 | 0,43 | 0,69 |
| Simpson 1-D        | 1,00 | 0,00 | 0,39 | 0,45 | 0,63 | 0,56 | 0,60 | 0,48 | 0,65 | 0,24 | 0,57 | 0,31 |
| Shannon $H'$       | 0,00 | 0,00 | 0,63 | 0,86 | 1,29 | 1,07 | 1,18 | 1,01 | 1,23 | 0,50 | 1,03 | 0,61 |
| Menhinick          | 0,51 | 0,00 | 0,88 | 0,81 | 1,26 | 0,91 | 0,87 | 0,68 | 0,80 | 0,80 | 0,62 | 0,52 |
| Margalef           | 0,00 | 0,00 | 0,69 | 0,94 | 1,55 | 1,06 | 1,44 | 1,29 | 1,17 | 0,88 | 1,00 | 0,68 |
| Equitabilidad $J'$ | 0,00 | 0,00 | 0,76 | 0,61 | 0,76 | 0,81 | 0,61 | 0,52 | 0,72 | 0,41 | 0,63 | 0,48 |

#### Densidad de perforación: comparación de zonas intermareales por cada localidad

El número de perforaciones que se encontró en los acantilados rocosos de las tres localidades de Bahía Málaga presentaron en general un comportamiento oscilatorio de incremento y disminución de perforaciones en las dos zonas intermareales evaluadas. En DP se observó que la zona intermareal media superó en densidad de perforación a la zona intermareal baja a partir del día 45 y hasta finalizar el experimento (día 160); sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticas entre ambas zonas en ninguna de las fechas de observación (Fig. 4a).

En JM los datos no son concluyentes debido a la pérdida de todos los cuadrantes de la zona baja intermareal, a causa de un evento de colmatación por arena que provocó el ascenso del nivel de playa cerca de 1 m. Sin embargo, se tiene que entre los días 0 y 45 de observación no se presentaron diferencias significativas en la densidad de perforación entre ambas zonas intermareales, a pesar de que éstas aumentaron en más del 50 %, el número de perforaciones entre dichas fechas (Fig. 4b).

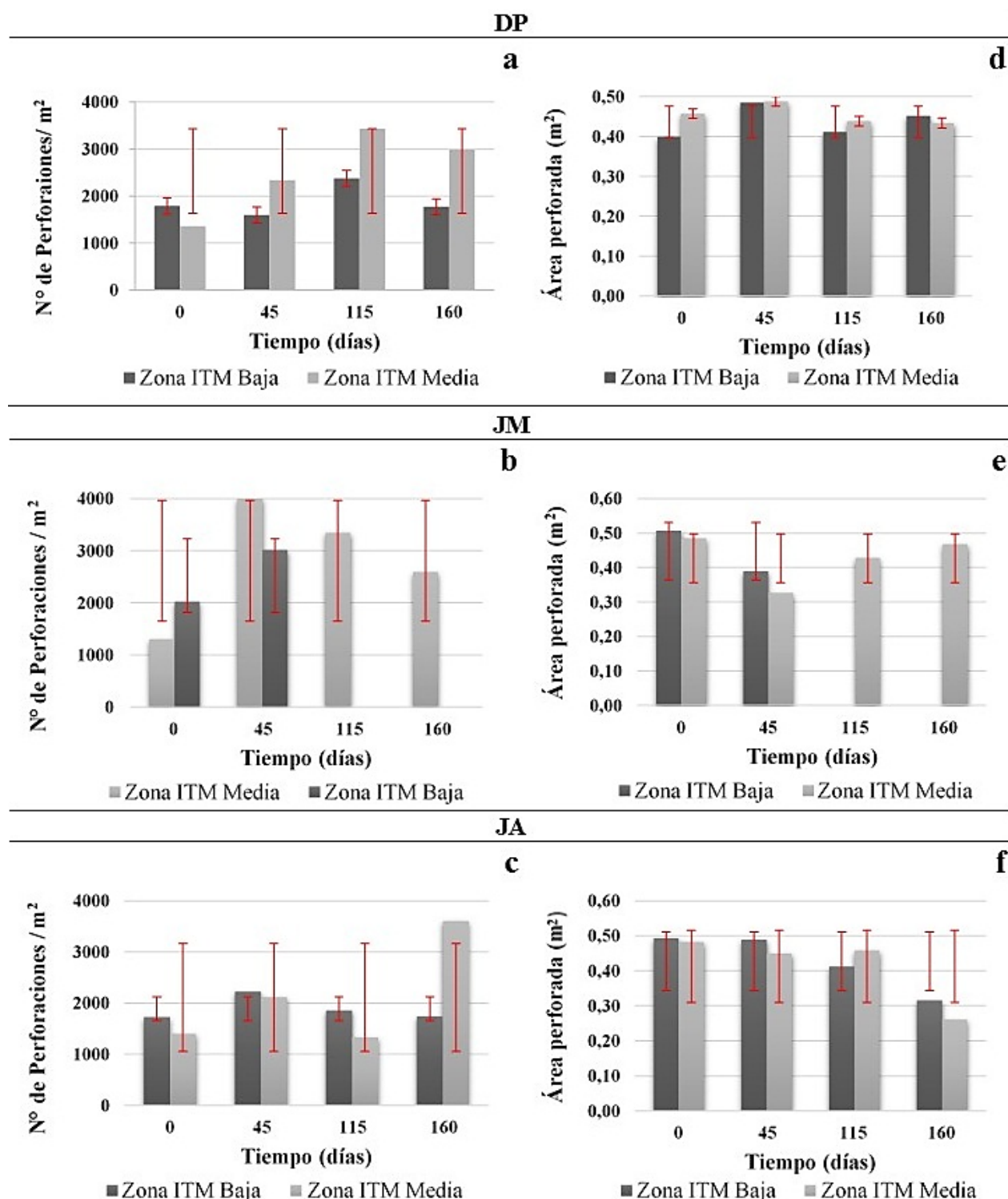
La densidad de perforación en JA mostró que la zona intermareal baja se encontró mayormente perforada a lo largo de los 115 días del comienzo del experimento, comparado con la zona media. No se encontraron dife-

rencias significativas entre estas fechas; sin embargo, entre los días 115 y 160 se observó un crecimiento mayor a un 200 % en el número de perforaciones presente en la zona intermareal media, lo que produjo diferencias significativas ( $p=0,03$ ) entre ambas zonas del intermareal rocoso (Fig. 4c).

En cuanto al tamaño de área perforada, se encontró en general en las tres localidades que la variación entre zonas intermareales es muy pequeña y cada una oscila entre el 25 % y el 50 % de área perforada por unidad de  $m^2$ . No se observaron diferencias significativas en ninguna de las comparaciones de cada localidad.

En DP se observó un comportamiento variable en los tamaños del área perforada, fluctuando en rangos aproximados de un 10 % en cada fecha ambas zonas intermareales. La zona media registró un mayor tamaño de área perforada comparado con la zona baja desde el día 0 al 115 (Fig. 4d).

Para JM se observó entre los días 0 y 45 que la zona baja registró un mayor tamaño de área perforada y que en el caso de ambas zonas del intermareal se presentó un descenso entre un 10 y un 15 % (Fig. 4e). Particularmente en JA se encontró un patrón de disminución en el tamaño de área perforada entre un 5 y un 10 % en ambas zonas intermareales a lo largo de las cuatro fechas de medición (Fig. 4f).



**Figura 4.** Número de perforaciones (a, b y c) y área perforada (d, e y f) en acantilados rocosos de baja (DP), mediana (JM) y alta (JA) exposición al oleaje en Bahía Málaga. (Zona ITM): zona intermareal. Las líneas rojas representan la desviación estándar para cada conjunto de datos.

#### Densidad de perforación: comparación de localidades por zona Intermareal

La comparación entre localidades para la zona interma-

real baja arrojó diferencias significativas ( $p=0,0304$ ) en el número de perforaciones entre DP y JM transcurridos 45 días de observación. Se observó un comportamiento variable para el número de perforaciones en las

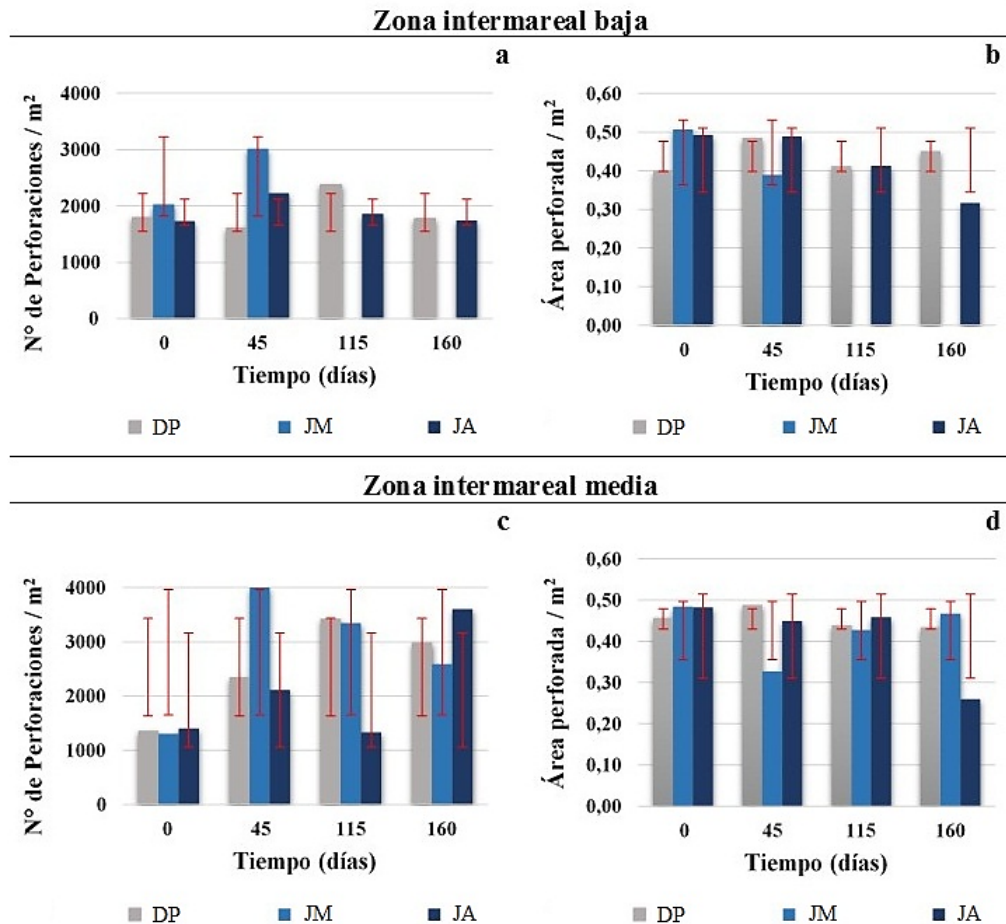


localidades DP y JA; mientras que JM no refleja tendencia concluyente, debido a la pérdida de cuadrantes por colmatación del acantilado. Sin embargo, entre el día 0 y 45 ésta fue la localidad que tuvo mayor número de perforaciones (Fig. 5a). En cuanto al área perforada, se presentaron en general rangos entre 30 y 50 % de perforación por  $m^2$  y se observaron diferencias entre localidades de hasta un 10 % en el tamaño de área erodada. Se presentaron diferencias significativas entre DP y JM ( $p=0,0303$ ) y JM y JA ( $p=0,0303$ ) al cabo de 45 días; así como también entre DP y JA ( $p=0,0282$ ) al cabo de 160 días. JM y JA mostraron tendencia a la reducción continua de área perforada a través del tiempo, mientras que DP mantuvo un comportamiento oscilatorio (Fig. 5b).

Para la zona intermareal media, la comparación entre localidades arrojó diferencias significativas en el número de perforaciones entre DP y JM ( $p=0,0499$ )

y entre JM y JA ( $p=0,0295$ ) pasados 45 días; entre DP y JA ( $p=0,0100$ ) y entre JM y JA ( $p=0,0121$ ) al cabo de 115 días de experimento. Se puede observar que DP y JM presentaron tendencia al incremento del número de perforaciones desde el día 0 al 115, pero disminuyeron igualmente al cabo de 160 días. JA mantuvo valores muy bajos comparado con las otras localidades entre los días 0 y 115; sin embargo, al cabo de 160 días registró un notable incremento en el número de perforaciones (Fig. 5c).

El tamaño de área perforada en la zona media intermareal mostró un comportamiento oscilatorio en todas las localidades. Se encontraron diferencias significativas entre DP y JM ( $p=0,0068$ ) y JM y JA ( $p=0,0242$ ) desde el día 0 al 45. Las diferencias entre localidades varían entre un 5 y un 10 % desde el día 0 al 115 y cerca de un 20 % al cabo de 160 días de experimento (Fig. 5d).



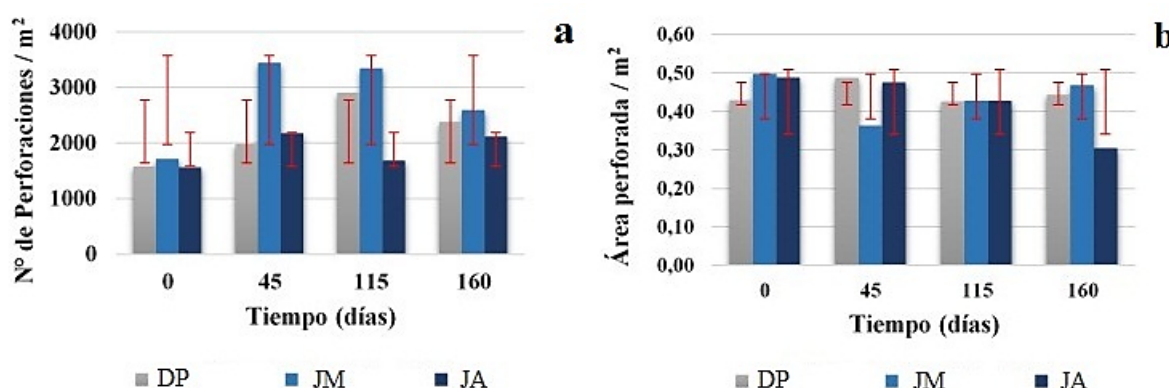
**Figura 5.** Número de perforaciones (a y c) y área total perforada (b y d) para la zona intermareal baja y media de las localidades DP (baja exposición), JM (mediana exposición) y JA (alta exposición) en Bahía Málaga. Las líneas rojas representan la desviación estándar para cada conjunto de datos.



### Densidad de perforación: comparación total entre localidades

La comparación del número total de perforaciones entre localidades mostró diferencias significativas entre DP y JM ( $p=0,0075$ ) y JM y JA ( $p=0,0205$ ) transcurridos 45 días de experimento. También se encontraron diferencias significa-

tivas entre DP y JA ( $p=0,0552$ ) y JM y JA ( $p=0,0102$ ) al cabo de 115 días (Fig. 6a). En la comparación del tamaño de área perforada se presentaron diferencias entre DP y JM ( $p=0,0139$ ) y JM y JA ( $p=0,0019$ ) transcurridos 45 días, pero al finalizar el experimento (160 días), sólo se encontraron diferencias significativas entre JM y JA ( $p=0,0405$ ) (Fig. 6b).



**Figura 6.** Comparación total por localidades para el número de perforaciones (a) y el tamaño total de área perforada (b) en las localidades DP (baja exposición), JM (mediana exposición) y JA (alta exposición) en Bahía Málaga. Las líneas rojas representan la desviación estándar para cada conjunto de datos.

DP presentó un aumento continuo en el número de perforaciones a través del tiempo; sin embargo, sólo se presentaron diferencias significativas ( $p=0,0194$ ) pasados 115 días. El incremento definitivo del número de perforaciones entre el mes de junio (día 0) y noviembre (día 160) fue del 34 % y el incremento total en el tamaño de área perforada fue del 3,3 %.

JM mostró ser la localidad con mayor número de perforaciones; allí se observó un crecimiento continuo hasta el día 115 y se presentaron diferencias significativas entre todas las mediciones con respecto al día inicial de seguimiento ( $p=0,017$ ). El incremento total del número de perforaciones en esta localidad fue del 34 %, mientras que su tamaño de área perforada disminuyó en un 6,1 %.

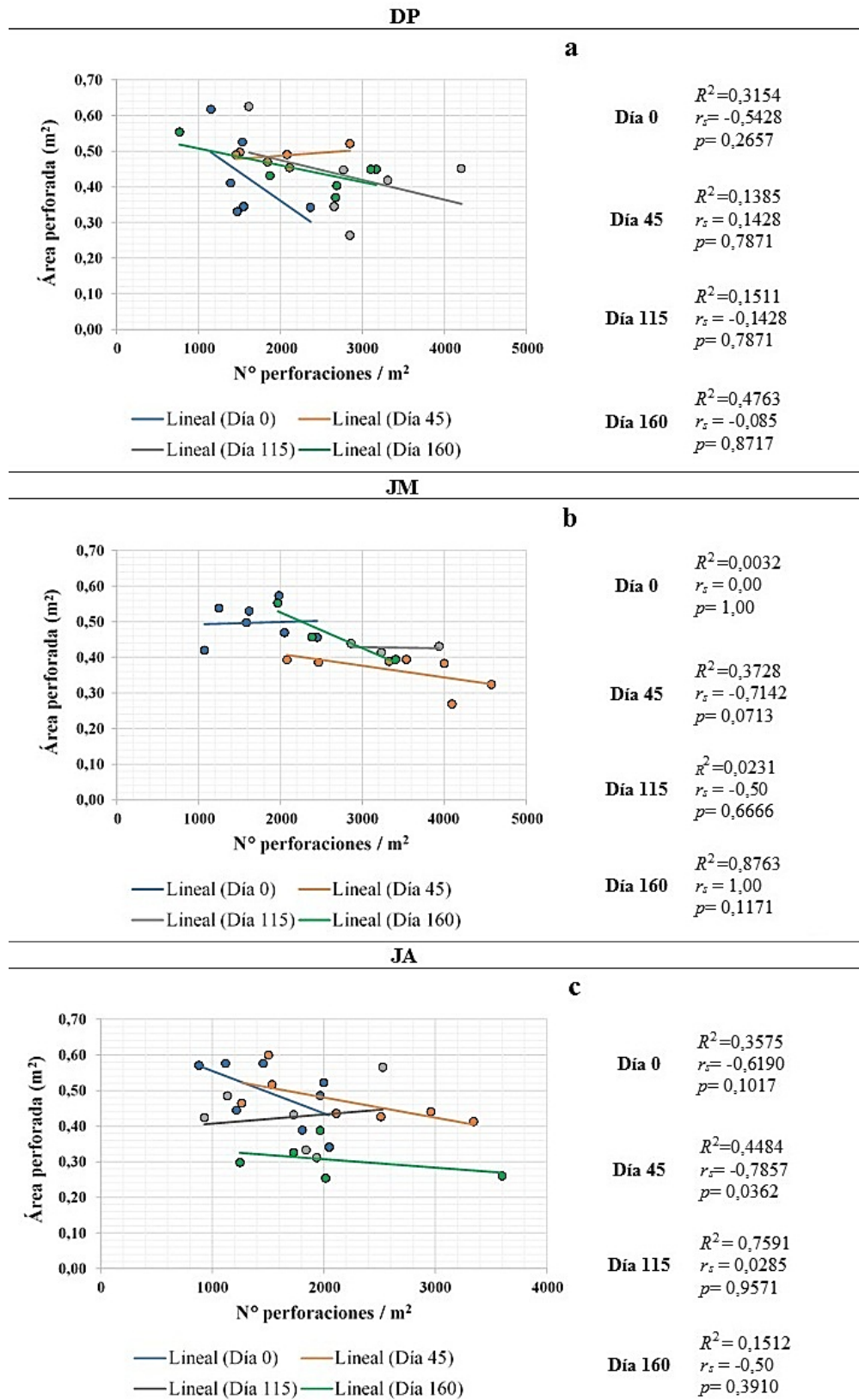
JA resultó ser la zona de menor número de perforaciones y menor tamaño de área perforada. En el número de perforaciones reflejó un comportamiento oscilatorio discreto a través del tiempo y tuvo un incremento total del 26 %; mientras que en el tamaño de área perforada se mostró una tendencia continua a la disminución; cayendo significativamente ( $p=0,0007$ ) en un 37,5 % al cabo de 160 días de seguimiento.

El análisis de correlación entre el número de perforaciones y el tamaño de área perforada en DP reveló correlaciones negativas, no significativas, al iniciar el experimento ( $r_s=$

$-0,5428$ ), al cabo de 115 días ( $r_s= -0,1428$ ) y 160 días ( $r_s= -0,085$ ) (Fig. 7a).

En JM se observó que inicialmente no hubo correlación entre el número de perforaciones y el tamaño de área perforada (día 0:  $r_s=0$ ). Pasados 45 y 115 días de experimento, se observaron correlaciones negativas moderadas a buenas ( $r_s= -0,7142$  y  $-0,50$  respectivamente), pero el  $R^2$  fue muy bajo para explicar estas relaciones y tampoco fueron estadísticamente significativas. Caso contrario se presentó al finalizar el experimento (día 160), donde se observó una correlación negativa perfecta ( $r_s= -1$ ) y aunque fue significativa, el  $R^2$  puede explicar en un 87,6 % la disminución en el número de perforaciones mientras incrementa el tamaño de área perforada en el acantilado (Fig. 7b).

En JA se observó al cabo de 45 días, una buena correlación negativa ( $r_s= -0,7857$ ) entre el número de perforaciones y el tamaño de área perforada, la cual fue estadísticamente significativa ( $p=0,0362$ ) y que puede ser explicada en un 44,8 %. Transcurridos 115 y 160 días de experimento, las correlaciones arrojaron valores mínimos y estadísticamente no significativos ( $r_s= 0,0285$  y  $r_s= -0,50$  respectivamente) (Fig. 7c).

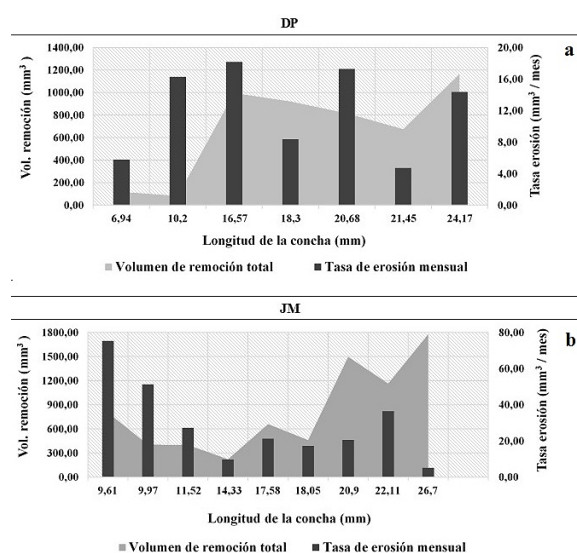


**Figura 7.** Análisis de correlación entre el número de perforaciones y el tamaño de área perforada en las localidades DP (baja exposición) (a), JM (mediana exposición) (b) y JA (alta exposición) (c) en Bahía Málaga. ( $R^2$ ): coeficiente de determinación; ( $r_s$ ): índice de correlación de Spearman; (p): p-valor.

## Volumen de remoción y tasa de bioerosión

Se recuperaron siete individuos de *Pholadidea tubifera* en DP y nueve en JM al finalizar el experimento (día 160). En JA no se encontró ningún individuo. La alta mortalidad pudo deberse a que los organismos quedaron muy expuestos al fuerte impacto del oleaje por el procedimiento empleado.

Se puede observar en general, que *Pholadidea tubifera* tuvo un menor volumen de remoción y una menor tasa de erosión mensual en DP que en JM. Por ejemplo, el volumen de remoción total de un individuo con 24,17 mm de longitud (talla máxima encontrada en DP) es menor a 1200 mm<sup>3</sup> de material rocoso a lo largo de su vida, mientras que en JM, un individuo de la misma talla remueve cerca de 1500 mm<sup>3</sup>. También se observó que para tallas cercanas a los 10 mm de longitud, la tasa de erosión fue de 16 mm<sup>3</sup>/mes en DP, mientras que en JM fue de aproximadamente 50 mm<sup>3</sup>/mes. En ambas localidades se observó una tendencia al aumento de volumen de remoción en correspondencia al incremento de la longitud de las conchas. En DP las tasas de erosión estuvieron entre 4,7 y 18,1 mm<sup>3</sup>/mes (Fig. 8a), mientras que en JM estuvieron entre 5,1 y 75,3 mm<sup>3</sup>/mes, siendo un rango más amplio y con una tendencia especial a la disminución de la tasa de erosión a medida que los individuos aumentan de tamaño (Fig. 8b).



**Figura 8.** Volumen de remoción total y tasas de erosión mensual observadas en *Pholadidea tubifera* para las localidades DP (baja exposición) (a) y JM (mediana exposición) (b) en Bahía Málaga.

## DISCUSIÓN

### Abundancia, diversidad y distribución de bivalvos endolíticos

Los resultados mostraron una tendencia al aumento de las variables estudiadas como indicadores del proceso de bioerosión en las áreas evaluadas a lo largo del tiempo de investigación. La riqueza de bivalvos endolíticos en las dos bahías mostró una tendencia al incremento en el número de

especies, con una interesante dinámica tanto en composición como en proporciones de las especies en el ensamblaje de las comunidades a través del tiempo. Veinte años atrás, Ricaurte (1995) reportó cinco especies en la localidad PN, de las cuales hoy no se encontró a *Leiosolenus hastatus*, *Petricola cognata*, *Pholas chiloensis* y *Jouannetia duchassaingii*. Cantera *et al.* (1998) registraron para la zona un total de siete especies, donde *Cyrtopleura crucigera* era la especie de mayor dominancia; Cobo (2007) reportó diez especies, de las cuales ya no se encuentran *Corbula* sp., *Cryptomya californica* y *Barnea subtruncata*, y reportó a *Isognomon janus* como la especie más dominante. Estos datos contrastan fuertemente con lo obtenido en este trabajo, donde se encontraron en total 13 especies y las de mayor dominancia fueron *Pholadidea tubifera*, *Brachidontes semilaevis* y en menor proporción *Isognomon janus*.

Cobo (2007) reportó tres especies en CJ, de las cuales no se encontró en este trabajo a *Brachidontes playasensis*. Sin embargo, ambos trabajos concuerdan en que *Cyrtopleura crucigera* fue la especie de mayor dominancia. En el caso de la localidad AG, Cantera *et al.* (1998) encontraron cinco especies, siendo *C. crucigera* y *Pholas chiloensis* las de mayor abundancia. Hoy en día sólo puede encontrarse a *C. crucigera* y en muy baja densidad. El decline en la riqueza y abundancia pueden ser atribuidas principalmente al creciente aporte de materia orgánica y otros contaminantes al interior de la bahía (Ospina *et al.* 2006).

En un trabajo sobre moluscos de Bahía Málaga, que recopila la información existente en muestreos realizados entre 2004 y 2012, López de Mesa & Cantera (2015) registraron ocho especies de bivalvos endolíticos en la localidad DP y nueve en Juanchaco (incluye JM y JA). Estos datos se acercan bastante a los resultados hallados en este trabajo, con 11, 10 y 9 especies respectivamente para cada localidad. Estos autores no registraron a *Cyrtopleura crucigera* y *Jouannetia pectinata*, a pesar de ser especies muy abundantes en este trabajo. En cambio reportaron a *Saccostrea palmula* y *Petricola olssoni*, especies que no fueron halladas en este trabajo.

También Cantera *et al.* (1998) mencionan una diversidad de especies perforadoras en Bahía Málaga con valores entre  $H' = 1,57$  y  $2,63$  y en Bahía Buenaventura con valores entre  $H' = 1,45$  y  $2,34$ ; esto en un estudio donde se incluyeron otros grupos taxonómicos también perforadores como lo son algunas especies de crustáceos. Lo anterior muestra que la diversidad de bivalvos endolíticos hallada en ambas bahías con valores entre  $H' = 0,63$  y  $1,29$  para Buenaventura y  $H' = 0,50$  y  $1,23$  para Málaga es alta para un grupo taxonómico no excesivamente diverso.

Es posible que la distribución espacial de los bivalvos endolíticos se encuentre más fuertemente influenciada por el tipo de roca del lugar que por la intensidad del impacto del oleaje al acantilado. Cardona *et al.* (datos no publ.) señalan que las estructuras rocosas presentes en bahía Málaga exponen estratificaciones plano-paralelas definidas por intercalaciones de lodolitas y areniscas, en las que organismos perforadores tienen preferencia de hábitat entre las secciones de arenisca. Lo anterior cobra sentido en los casos de agregación observados en las especies de mayor abun-

dancia como *Pholadidea tubifera*, *Jouannetia pectinata* y *Cyrtopleura crucigera*; las cuales eventualmente pueden desplazar a otras especies menos abundantes como *Brachidontes* y *Petricola* hacia sustratos más blandos. Cobo & Cantera (2015) mencionan algunas especies de Petricolidae como responsables de la mayor cantidad de perforaciones en rocas blandas lo cual apoyaría esta idea.

La acción del oleaje no es concluyente en cuanto a la diversidad y abundancia de las especies, pues se observó que en bahía Buenaventura, CJ (alta exposición) mostró la mayor diversidad y mayor número de individuos, mientras que en bahía Málaga fue DP (baja exposición) la más diversa y la segunda más abundante. Sin embargo, si puede observarse mayor diversidad y abundancia en los intermareales bajos respecto a los medios en todas las localidades, con excepción en DP. Lo anterior está directamente relacionado con aspectos fisiológicos de los organismos, pues pasan menor tiempo expuestos a cambios de temperatura y desecación (Connell 1961) o con características propias de cada acantilado (inclinación, altura de la arena, tipo de rocas). El caso de DP puede ser explicado por la gran cobertura de esponjas sobre el intermareal bajo en este acantilado particular, lo que dificultaría la colonización y establecimiento de bivalvos juveniles.

#### **Densidad de perforación: número de perforaciones y área superficial erosionada**

El número de perforaciones que se tuvieron en promedio por  $m^2$  en las localidades de bahía Málaga fueron mayores en la zona intermareal media que en la zona baja, teniendo 2843 y 2098 agujeros  $/m^2$  respectivamente. Cantera *et al.* (1998) encontraron en promedio 880 para la zona media y 1760 agujeros  $/m^2$  para la zona baja. Las cifras varían debido a las diferencias en el tipo de conteo, pues en este trabajo se tomaron en consideración perforaciones a partir de 0,1 cm de diámetro. También se discrepa en las proporciones de los agujeros respecto a la zona intermareal, siendo en éste caso la zona media mayormente perforada. Esto puede explicarse porque la zona baja es la principal afectada en el desprendimiento de bloques y la colmatación con arena, procesos que someten al acantilado a periódicas perturbaciones y diferentes estados sucesionales a través del tiempo que pueden variar el número de perforaciones.

Otro factor puede deberse a la colonización de diversos organismos como algas pardas, anémonas, esponjas y gusanos Sabélidos formadores de arrecifes, los cuales se asientan principalmente en el intermareal bajo o medio-bajo y que al momento del conteo estuvieron cubriendo algunas áreas perforadas haciéndolas poco visibles o dificultando la bioerosión.

A pesar de que no se encontraron patrones claros de incremento o disminución de perforaciones, sino más bien comportamientos oscilatorios a través del tiempo, se observó que en el promedio acumulado fue JM la localidad de mayor densidad de perforación (2713 perf./ $m^2$ ), seguida por DP (2208 perf./ $m^2$ ) y finalmente JA (1999 perf./ $m^2$ ). Con esto se evidencia que a menor exposición al oleaje, la actividad de los organismos perforadores se da de manera continua,

pues el acantilado está menos expuesto a perturbaciones. Además se incrementa la diversidad del ecosistema gracias a una mayor complejidad topográfica del sustrato rocoso (Pinn *et al.* 2008).

Las correlaciones entre el número de perforaciones y el tamaño de área perforada resultaron negativas en todos los casos. Éstas aunque no fueron estadísticamente significativas, podrían estar mostrando un proceso clave de la bioerosión: el crecimiento progresivo de las perforaciones, la unión entre éstas para hacer agujeros cada vez más grandes hasta llegar finalmente a la formación de cavernas.

#### **Volumen y tasa de bioerosión**

Wisshak & Tapanila (2008) recopilan una serie de trabajos con bivalvos perforadores en los que mencionan que el ciclo de vida de algunas especies puede variar de acuerdo a las condiciones del hábitat. Cuando el individuo juvenil se ha establecido finalmente en un lugar, atraviesa una etapa activa donde crece y perfora rápidamente sobre el sustrato, luego se transforma en un adulto que alcanza su talla máxima y deja de perforar. Sin embargo, en condiciones de agregación, el juvenil tiene la capacidad de percibir las fronteras de madrigueras vecinas, por lo que puede alcanzar el estado de adultez e inactividad con tallas inferiores para evitar romper las paredes contiguas. A los adultos de este tipo se les denomina estenomórficos.

Este comportamiento se observó en los individuos juveniles de *Pholadidea tubifera* en JM, en los cuales la tasa de erosión era mayor en las tallas pequeñas y posteriormente iba declinando con las tallas grandes. Esto se debe probablemente a la presión que ejerce el medio sobre los organismos, dado que el hidrodinamismo en JM es mayor que en DP y por ende, los individuos juveniles deben acelerar el ritmo de perforación para asegurar una madriguera bien protegida. Una vez logrado, la actividad disminuye.

Para el caso de DP, donde se observaron individuos grandes con tasas de erosión altas, puede suponerse que éstos reiniciaron su actividad perforadora debido a perturbaciones directas sobre la estructura de las madrigueras, dejándolos nuevamente expuestos a las condiciones ambientales externas al acantilado y obligándolos a profundizar otra vez para protegerse.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto de investigación titulado "Bioerosión en los acantilados rocosos de la costa central del Pacífico colombiano", código 7980 de la convocatoria interna No. 3-2014 de la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Valle (Cali-Colombia).

Agradezco al Grupo de Investigación en Ecología de Estuarios y Manglares, por el apoyo en la formulación, desarrollo y logística del proyecto; principalmente a Juan Lázarus, Miguel Cuellar y Paula Romero por el apoyo durante la fase de campo e identificación taxonómica de las especies. Agradezco especialmente al profesor Jaime Ricardo Cantera, por

la confianza y la cálida acogida en el proyecto, por el acompañamiento incondicional durante el desarrollo metodológico

y sus valiosas apreciaciones y consejos para culminar con éxito este trabajo.

## LITERATURA CITADA

- Bagur, M., Gutiérrez, J. L., Arribas, L. P. and Palomo, M. G. (2014). "Endolithic invertebrate communities and bioerosion rates in southwestern Atlantic intertidal consolidated sediments". *Mar Biol*, Vol. 161 No. 10, pp. 2279-2292.
- Bulleri, F. and Benedetti-Cecchi, L. (2006). "Mechanisms of recovery and resilience of different components of mosaics of habitats on shallow rocky reefs". *Oecologia*, Vol. 149 No. 3, pp. 482-492.
- Cantera, J. R. y Blanco, J. F. (2001). "The estuary ecosystem of Buenaventura Bay, Colombia". In: Seeliger, U. and Kjerfve, B. (Ed), *Coastal marine ecosystems of Latin America*. Ecological studies, Springer, Heidelberg, pp. 264-280.
- Cantera, J. R., Neira, R. y Ricaurte, C. (1998). *Bioerosión en la Costa Pacífica Colombiana: Un estudio de la biodiversidad, la ecología y el impacto humano de los animales destructores de los acantilados rocosos*. Fondo FEN Colombia, Bogotá, Colombia.
- Cantera, J. R., Londoño-Cruz, E., Mejía-Ladino, L. M., Herrera-Orozco, L., Satizabal, C. y Uribe-Castañeda, N. (2013). "Environmental Issues of a Marine Protected Area in a Tectonic Estuary in the Tropical Eastern Pacific: Uramba (Malaga Bay Colombia): Context, Biodiversity, Threats and Challenges". *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 5 No. 11, pp. 1037-1047.
- Cobo, A. (2007). *Medición de volúmenes de bioerosión debida a perforación y fauna asociada a este proceso en dos acantilados rocosos terciarios de la bahía de Buenaventura, Pacífico Colombiano*. Tesis de pregrado, Universidad del Valle. Cali-Colombia. 66p.
- Cobo, A. M. and Cantera, J. R. (2015). "Main factors determining bioerosion patterns on rocky cliffs in a drowned valley estuary in the Colombian Pacific (Eastern Tropical Pacific)". *Geomorphology*, Vol. 246, pp. 220-231.
- Connell, J. B. (1961). "The influence of interspecific competition and other factors on the distribution of the barnacle *Chthamalus stellatus*". *Ecology* Vol. 42, pp. 710-723.
- Galvis, J. y Mojica, J. (1993). "Geología". In: Leyva, P. (Ed.) *Colombia Pacífico*, Tomo I, Fondo FEN-Proyecto Biopacífico, Santa Fé de Bogotá, pp. 80-96.
- Kazmer, M., and Taborosi, D. (2012). "Bioerosion on the small scale—examples from the tropical and subtropical littoral". *Hantkeniana*, Vol. 7, pp. 37-94.
- Little, C. and Kitching, J. A. (1996). *The biology of rocky shores (biology of habitats)*. Oxford University Press, New York.
- Lopez de Mesa, L. Á. and Cantera, J. R. (2015). "Marine mollusks of Bahía Málaga, Colombia (Tropical Eastern Pacific)". *Check List*, Vol. 11, No 1, 1497.
- Martínez, J. O. (1993). "Geomorfología" en: Leyva, P. (Ed): *Colombia: Pacífico*, Tomo I. Fondo para la Protección del Medio Ambiente José Celestino Mutis, FEN, Santafé de Bogotá, pp: 110-119.
- Naylor, L. A., Coombes, M. A. and Viles, H. A. (2012). "Reconceptualising the role of organisms in the erosion of rock coasts: A new model". *Geomorphology*, Vol. 157, pp. 17-30.
- Odum, E. P. (1993). *Ecology and our endangered life-support systems*. 2nd ed. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts.
- Ospina, N., Peña, E. y Benítez, R. (2006). "Efecto de la salinidad en la capacidad de bioacumulación de plomo en el alga verde *Rhizoclonium riparium* (Roth) Harvey (Chlorophyceae, Cladophorales)". *Actual biol*, Vol. 28, No. 84, pp. 17-25.
- Pinn, E. H., Thompson, R. C. and Hawkins, S. J. (2008). "Piddocks (Mollusca: Bivalvia: Pholadidae) increase topographical complexity and species diversity in the intertidal". *Marine Ecology Progress* Vol. 355, pp. 173-182.
- Posada, B. O., Henao, W. y Guzmán, G. (2009). *Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano*. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 17, Santa Marta.
- Stearley, R. F. and Ekdale, A. A. (1989). "Modern Marine Bioerosion by Macroinvertebrates, Northern Gulf of California". *PALAIOS*, Vol. 4 No. 5, pp. 453-467.
- Sunamura, T. (1994). "Rock control in coastal geomorphic processes". *Transactions - Japanese Geomorphological Union*, Vol. 15, pp. 253-272.
- Wisshak, M. and Tapanila, L. (Eds.). (2008). *Current developments in bioerosion*. Springer Science & Business Media.